

ĐHBK Tp HCM-Khoa Đ-ĐT
BMĐT
GVPT: Hồ Trung Mỹ
Môn học: Dụng cụ bán dẫn

Chương 2

Dải năng lượng và nồng độ hạt dẫn ở cân bằng nhiệt

cuu duong than cong . com

Nội dung

1. Vật liệu bán dẫn
2. Cấu trúc tinh thể cơ bản
3. Liên kết hóa trị
4. Dải năng lượng
5. Nồng độ hạt dẫn nội tại
6. Các chất donor và acceptor.
7. Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn loại N và P

2

2.1 Vật liệu bán dẫn

3

cuu duong than cong . com

Control of Conductivity is the Key to Modern Electronic Devices

- Conductivity, σ , is the ease with which a given material conducts electricity.
- Ohms Law: $V=IR$ or $J=\sigma E$ where J is current density and E is electric field.
 - Metals: High conductivity
 - Insulators: Low Conductivity
 - Semiconductors: Conductivity can be varied by several orders of magnitude.
- It is the ability to control conductivity that make semiconductors useful as “current/voltage control elements”. “Current/Voltage control” is the key to switches (digital logic including microprocessors etc...), amplifiers, LEDs, LASERs, photodetectors, etc...

4

Classifications of Electronic Materials

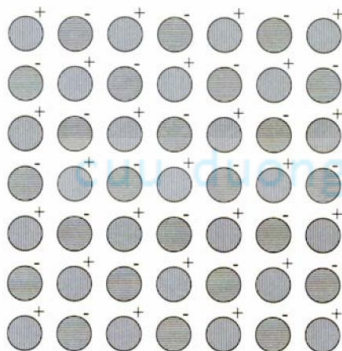
- Electrical/Computer engineers like to classify materials based on electrical behavior (insulating, semi-insulating, and metals).
- Materials Engineers/Scientists classify materials based on bond type (covalent, ionic, metallic, or van der Waals), or structure (crystalline, polycrystalline, amorphous, etc...).
- In 20-50 years, EE's may not be using semiconductors at all!! Polymers or bio-electronics may replace them! However the materials science will be the same!

5

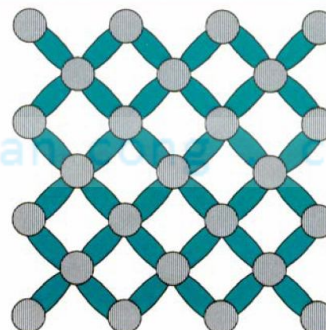
cuu duong than cong . com

Material Classifications based on Bonding Method

- Bonds can be classified as metallic, Ionic, Covalent, and van der Waals.



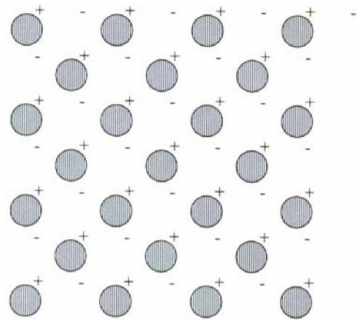
Ionic Bonding: One atom acquires and holds the electron(s) of an adjacent atom. Bonding is coulombic and strong.



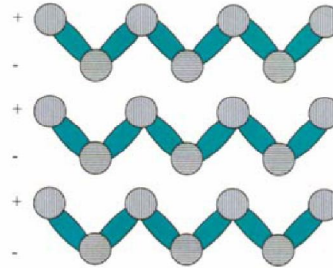
Covalent Bonding: Atoms share electrons with the surrounding atoms. Bonding is moderately weak.

6

Material Classifications based on Bonding Method



Metallic Bonding: Atoms give up electrons to the surrounding regions, forming an “electron cloud”. Bonding is coulombic but weak due to screening of charge.



Van der Waals Bonding: Neutrally charged molecules form dipoles which are attracted to other dipoles. Bonding is extremely weak, but long chains can form.

7

cuu duong than cong . com

Material Classifications based on Crystal Structure

❑ **Amorphous Materials**

No discernible long range atomic order (no detectable crystal structure). Examples are silicon dioxide (SiO_2), amorphous-Si, silicon nitride (Si_3N_4), and others. Though usually thought of as less perfect than crystalline materials, this class of materials is extremely useful.

❑ **Polycrystalline Materials**

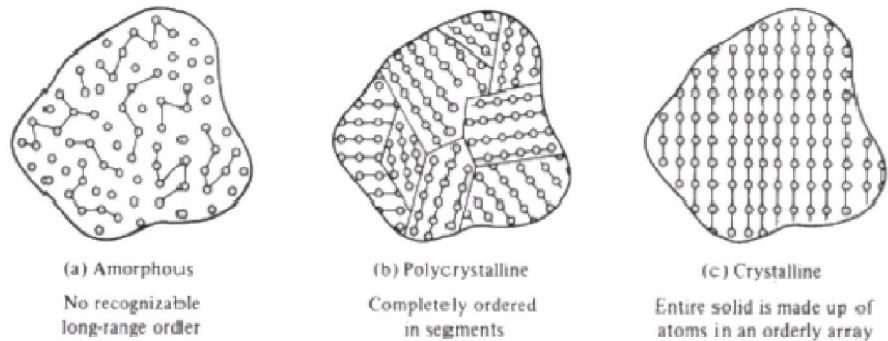
Material consisting of several “domains” of crystalline material. Each domain can be oriented differently than other domains. However, within a single domain, the material is crystalline. The size of the domains may range from cubic nanometers to several cubic centimeters. Many semiconductors are polycrystalline as are most metals.

❑ **Crystalline Materials**

Crystalline materials are characterized by an atomic symmetry that repeats spatially. The shape of the unit cell depends on the bonding of the material. The most common unit cell structures are diamond, zincblende (a derivative of the diamond structure), hexagonal, and rock salt (simple cubic).

8

Material Classifications based on Crystal Structure

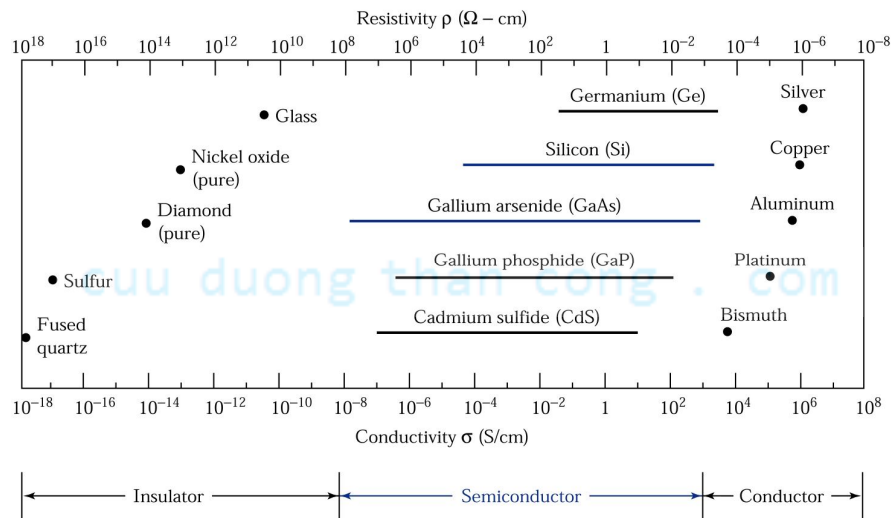


General classification of solids based on the degree of atomic order: (a) amorphous, (b) polycrystalline, and (c) crystalline.

9

cuu duong than cong . com

Conductivities for insulators, semiconductors, and conductors.



10

Element Semiconductors (Các chất bán dẫn nguyên tố)

Bảng phân loại tuần hoàn của vật liệu bán dẫn

Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B	C	N	O
		Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen
3	Mg	Al	Si	P	S
	Magnesium	Aluminum	Silicon	Phosphorus	Sulfur
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
	Cadmium	Indium	Tin	Antimony	Tellurium
6	Hg		Pb		
	Mercury		Lead		

11

cuu duong than cong . com

Compound Semiconductors (Các chất bán dẫn hỗn hợp)

- ❑ Những năm gần đây người ta sử dụng nhiều các chất bán dẫn hỗn hợp trong nhiều loại dụng cụ bán dẫn.
- ❑ Có các chất bán dẫn hỗn hợp từ 2 nguyên tố (nhị hợp), 3 nguyên tố (tam hợp) và 4 nguyên tố (tứ hợp).
- ❑ Nhiều chất bán dẫn có các tính chất điện và quang khác với Silicon. Đặc biệt là GaAs được dùng làm vật liệu chính để chế tạo các dụng cụ trong các ứng dụng quang điện tử và chuyển mạch tốc độ cao

12

Các chất bán dẫn nguyên tố và hỗn hợp

TABLE 2 Semiconductor Materials²

General Classification	Semiconductor	
	Symbol	Name
Element	Si	Silicon
	Ge	Germanium
Binary compound		
IV-IV -----	SiC	Silicon carbide
III-V -----	AlP	Aluminum phosphide
	AlAs	Aluminum arsenide
	AlSb	Aluminum antimonide
	GaN	Gallium nitride
	GaP	Gallium phosphide
	GaAs	Gallium areside
	GaSb	Gallium antimonide
	InP	Indium phosphide
	InAs	Indium arsenide
	InSb	Indium antimonide

13

cuu duong than cong . com

Các chất bán dẫn nguyên tố và hỗn hợp (tt)

II-VI -----	ZnO	Zinc oxide
	ZnS	Zinc sulfide
	ZnSe	Zinc selenide
	ZnTe	Zinc telluride
	CdS	Cadmium sulfide
	CdSe	Cadmium selenide
	CdTe	Cadmium telluride
	HgS	Mercury sulfide
	PbS	Lead sulfide
	PbSe	Lead selenide
IV-VI -----	PbTe	Lead telluride
Ternary compound	$Al_xGa_{1-x}As$	Aluminum gallium arsenide
	$Al_xIn_{1-x}As$	Aluminum indium arsenide
	$GaAs_{1-x}P_x$	Gallium arsenic phosphide
	$Ga_xIn_{1-x}As$	Gallium indium arsenide
	$Ga_xIn_{1-x}P$	Gallium indium phosphide
Quaternary compound	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$	Aluminum gallium arsenic antimonide
	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_y$	Gallium indium arsenic phosphide

14

2.2 Cấu trúc tinh thể cơ bản

15

cuu duong than cong . com

Khái niệm mạng và tế bào đơn vị

- Ta sẽ nghiên cứu vật liệu bán dẫn đơn tinh thể, mà trong đó các nguyên tử được sắp xếp tuần hoàn trong không gian. Sự sắp xếp tuần hoàn của các nguyên tử trong tinh thể được gọi là **mạng (lattice)**.
- Trong tinh thể, nguyên tử sẽ dao động (do nhiệt) quanh 1 vị trí cố định.
- Với bán dẫn cho trước, có **tế bào đơn vị (unit cell)** đại diện cho toàn bộ mạng [tinh thể]; bằng cách lặp lại tế bào đơn vị trong tinh thể ta có toàn bộ mạng tinh thể.

16

Tế bào đơn vị

- Tế bào đơn vị có thể được đặc trưng bằng vector **R** (được tạo thành từ các vector **a**, **b**, **c** [các vector này không nhất thiết phải vuông góc với nhau và chiều dài của chúng có thể bằng hay không bằng nhau] và các số nguyên m, n và p)

$$\mathbf{R} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + p\mathbf{c}$$

- Các vector **a**, **b**, và **c** được gọi là các **hằng số mạng** (*lattice constants*).

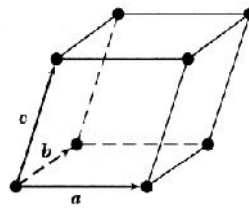


Fig. 2 A generalized primitive unit cell.

17

cuu duong than cong . com

Một số tế bào đơn vị tinh thể lập phương cơ bản

- Các tế bào đơn vị khác nhau dựa trên các tế bào đơn vị lập phương: tế bào đơn vị lập phương đơn giản (SC), tế bào đơn vị lập phương tập trung bên trong (BCC), và tế bào đơn vị lập phương tập trung bề mặt (FCC)

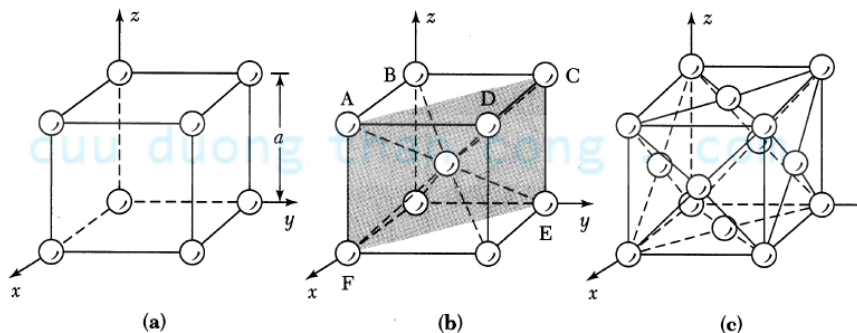


Fig. 3 Three cubic-crystal unit cells. (a) Simple cubic. (b) Body-centered cubic. (c) Face-centered cubic.

18

Cấu trúc mạng tinh thể kim cương

- ❑ Silicon và germanium có một cấu trúc tinh thể kim cương.
- ❑ Cấu trúc silicon thuộc về lớp những tế bào đơn vị lập phương tập trung bề mặt. Tế bào đơn vị silicon gồm có tám nguyên tử silicon.
- ❑ Cấu trúc có thể được nhìn thấy như hai mạng tinh thể con (bề mặt) thâm nhập nhau với một mạng con được đổi chỗ bởi một mạng con khác bằng $\frac{1}{4}$ khoảng cách dọc theo đường chéo bên trong khối lập phương
- ❑ Hầu hết những chất bán dẫn III/V tăng trưởng theo mạng tinh thể zincblende, mà đồng nhất với một mạng tinh thể kim cương chỉ có điều một trong số những mạng tinh thể con tế bào lập phương tập trung bề mặt có nguyên tử gallium (Ga) và những nguyên tử arsenic (As) khác.

19

cuu duong than cong . com

Cấu trúc mạng tinh thể kim cương (tt)

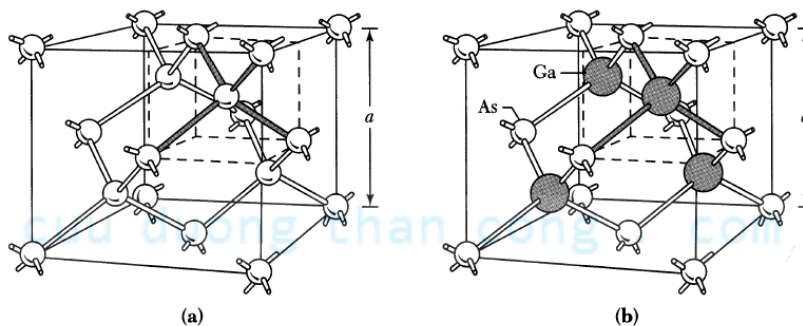
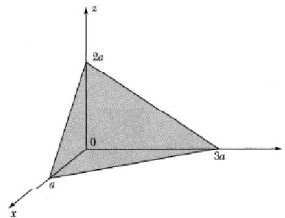


Fig.4 (a) Diamond lattice. (b) Zincblende lattice.

20

Các mặt phẳng tinh thể và chỉ số Miller

- Các tính chất tinh thể theo những mặt phẳng khác nhau thì khác nhau và những tính chất điện, nhiệt, và cơ có thể phụ thuộc vào hướng tinh thể.
- Các **chỉ số [Miller]** dùng để định nghĩa những mặt phẳng trong tinh thể.
- **Thí dụ:** Xác định mặt phẳng tinh thể
Mặt phẳng giao với các trục tọa độ tại a , $3a$, và $2a$. Lấy nghịch đảo của các tọa độ này ta được 1 , $1/3$ và $1/2$. Ba số nguyên nhỏ nhất có các tỉ số 6 , 2 và 3 . Như vậy mặt phẳng này có thể được xem như mặt phẳng (623) .



21

cuu duong than cong . com

Các mặt phẳng tinh thể và chỉ số Miller (tt)

Các qui ước định nghĩa chỉ số Miller:

- (hkl) : một mặt phẳng
- $[hkl]$: hướng tinh thể là điểm trong mạng tinh thể gần gốc tọa độ nhất theo hướng mong muốn.
- $\{hkl\}$: họ các mặt phẳng tương đương đối xứng

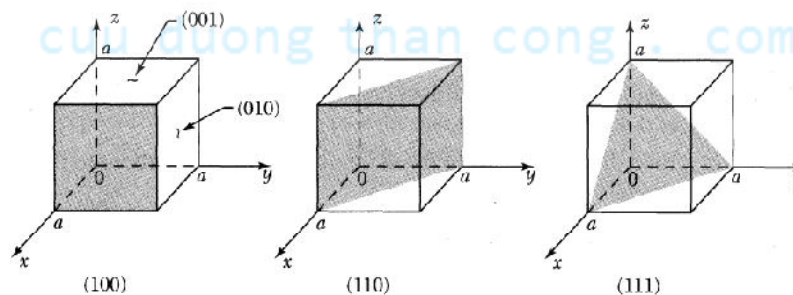
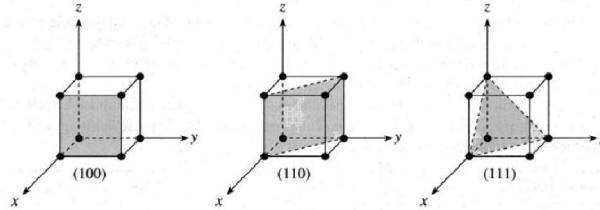


Fig. 6 Miller indices of some important planes in a cubic crystal.

22

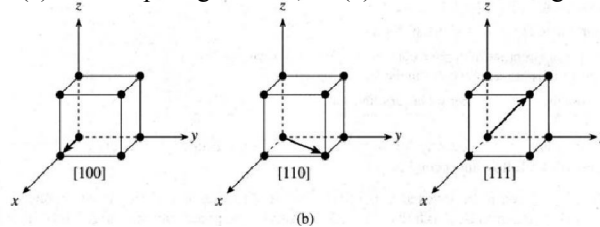
Các mặt phẳng tinh thể và chỉ số Miller (tt)

- Khi có tọa độ âm thì ghi số dương tương ứng và có đường gạch trên con số, thí dụ hướng tinh thể có tọa độ $-1, -1, 1$ thì người ta ghi là $[\bar{1}\bar{1}1]$



Các chỉ số Miller thường gặp:

(a) các mặt phẳng tinh thể, và (b) các vector hướng



23

cuu duong than cong . com

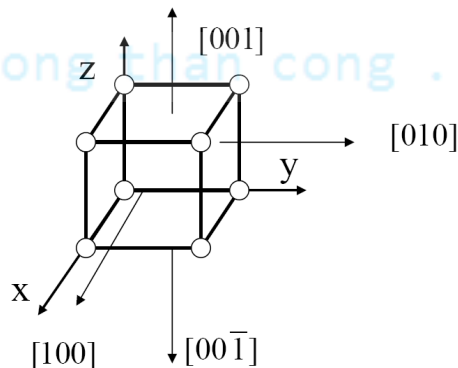
Các mặt phẳng tinh thể và chỉ số Miller (tt)

Trong các mạng tinh thể lập phương, hướng $[hkl]$ vuông góc với mặt phẳng (hkl) .

Thí dụ: họ mặt phẳng $\{100\}$ là:

$$\{100\} = (100), (010), (001), (\bar{1}00), (0\bar{1}0), (00\bar{1})$$

- Thí dụ một số hướng tinh thể



24

2.3 Các liên kết hóa trị (Valence bonds)

25

[cuu duong than cong . com](http://cuuduongthancong.com)

Liên kết đồng hóa trị và liên kết ion

Trong các dụng cụ bán dẫn có thể gặp các liên kết sau:

- Liên kết đồng hóa trị (covalent bonding)
- Liên kết ion (ionic bonding)

[cuu duong than cong . com](http://cuuduongthancong.com)

Trong bán dẫn nguyên tố dùng các liên kết đồng hóa trị; còn trong bán dẫn hỗn hợp thì sử dụng cả liên kết đồng hóa trị và liên kết ion.

26

The periodic table

1A	2A		3A	4A	5A	6A	7A	8A
Li	Be							He
Na	Mg		B	C	N	O	F	Ne
K	Ca		Al	Si	P	S	Cl	Ar
Rb	Sr		Zn	Ga	Ge	As	Se	Kr
Cs	Ba		Cd	In	Sn	Sb	Te	Xe
Fr	Rd		Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At
								Rn

Groups 3B, 4B, 5B, 6B
7B, 8B, 1B lie in here

A section of the periodic table

cuu duong than cong . com

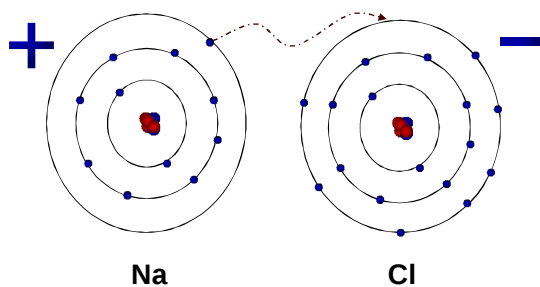
Liên kết ion (Ionic bonding)

- Liên kết ion do **lực hút tĩnh điện giữa các ion tích điện dương và âm** (giữa 1A và 7A).
- Quá trình này dẫn đến chuyển điện tử và tạo thành các ion có tích điện; ion tích điện dương do nguyên tử mất điện tử và ion tích điện âm do nguyên tử có thêm điện tử.
- Tất cả các hỗn hợp ion là chất rắn đơn tinh thể ở nhiệt độ phòng.
- NaCl và CsCl là các thí dụ tiêu biểu cho liên kết ion.
- Các tinh thể ion thì có điểm nóng chảy cao, rắn giòn và có thể hòa tan được trong các chất lỏng thông thường.

28

Ionic bonding

The metallic elements have only up to the valence electrons in their outer shell will lose their electrons and become positive ions, whereas electronegative elements tend to acquire additional electrons to complete their octet and become negative ions, or anions.

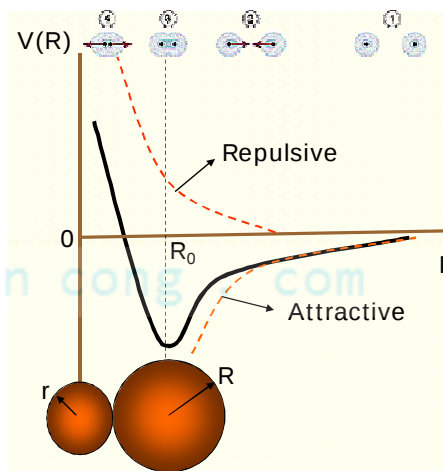


29

cuu duong than cong . com

Ionic bonding

- This typical curve has a minimum at equilibrium distance R_0
- $R > R_0$;
 - the potential increases gradually, approaching 0 as $R \rightarrow \infty$
 - the force is attractive
- $R < R_0$;
 - the potential increases very rapidly, approaching ∞ at small radius.
 - the force is repulsive



30

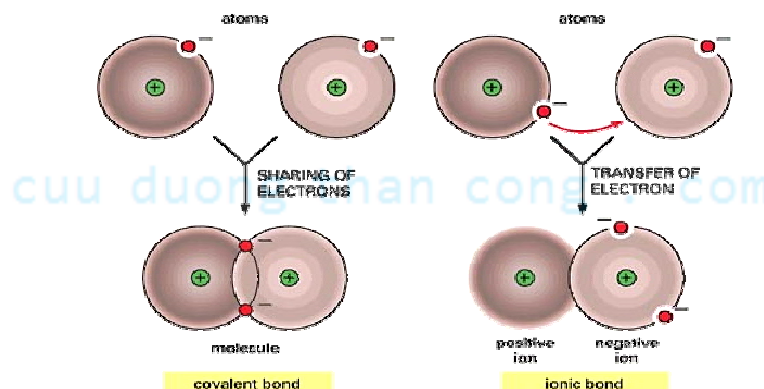
Liên kết đồng hóa trị (Covalent bonding)

- Các chất bán dẫn nguyên tố Si, Ge và kim cương được liên kết bằng cơ chế này và chúng thuần đồng hóa trị.
- Liên kết này là do **dùng chung các điện tử**. (mỗi cặp điện tử tạo nên liên kết đồng hóa trị)
- Các chất rắn có liên kết đồng hóa trị thì có điểm nóng chảy cao, rắn và không hòa tan trong các chất lỏng thông thường.
- Các bán dẫn hỗn hợp sử dụng cả các liên kết đồng hóa trị và liên kết ion.

31

cuu duong than cong . com

Comparison of Ionic and Covalent Bonding



32

Thí dụ liên kết đồng hóa trị với các chất có 4 điện tử hóa trị

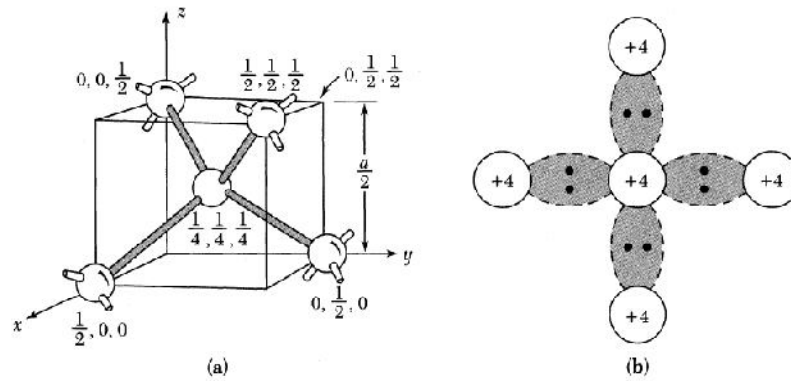


Fig. 11 (a) A tetrahedron bond. (b) Schematic two-dimensional representation of a tetrahedron bond.

33

cuu duong than cong . com

- Ở nhiệt độ thấp các điện tử được ràng buộc theo mạng tinh thể tứ diện tương ứng.
- Khi nhiệt độ cao hơn thì các dao động nhiệt sẽ làm gãy các liên kết đồng hóa trị.

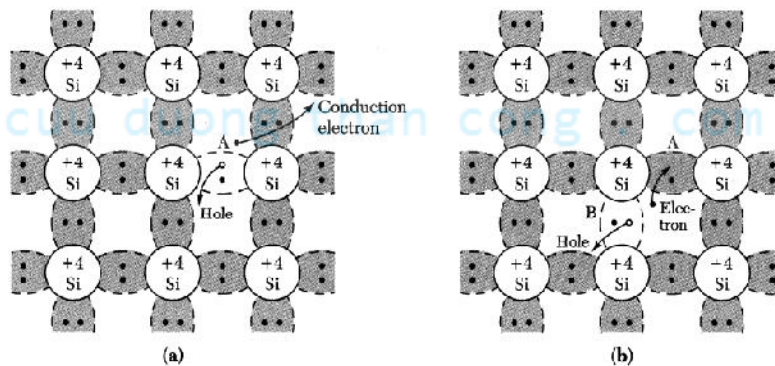


Fig. 12 The basic bond representation of intrinsic silicon. (a) A broken bond at position A, resulting in a conduction electron and a hole. (b) A broken bond at position B.

4

2.4 Các dải năng lượng (Energy bands)

35

cuu duong than cong . com

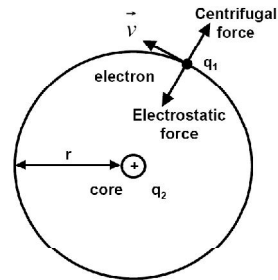
Những mức năng lượng của 1 nguyên tử được cách ly

- Để hiểu những tính chất của những chất bán dẫn, ta cần phải hiểu những tính chất của những nguyên tử tạo thành chúng.
- Theo mô hình của Bohr thì nguyên tử gồm có một lõi, mà về cơ bản chứa toàn bộ khối lượng của nguyên tử. Vỏ gần như không có khối lượng. Hầu như mọi khối lượng được tập trung trong lõi có đường kính nhỏ 10^{-15} m , khi đó so sánh với đường kính vỏ 10^{-10} m = 0.1 nm = 1Å(Ångstrom).
- Lõi gồm có những neutron và những proton. Lõi mang điện tích dương. Vỏ (vỏ điện tử) mang điện tích âm vì có những điện tử trên các quỹ đạo trong vỏ. Nhưng toàn bộ nguyên tử thì không có điện tích hay trung hòa điện.
- Những điện tử như những vệ tinh. Chúng quay xung quanh lõi trên quỹ đạo nhất định. Những điện tử được làm ổn định trên những quỹ đạo của chúng do sự cân bằng của những lực ly tâm và Coulomb.

36

Nguyên tử Hydrogen

- Do sự cân bằng giữa lực ly tâm và lực tĩnh điện, tồn tại một liên hệ vận tốc điện tử và bán kính của lõi. Vận tốc của mỗi điện tử liên hệ với bán kính quỹ đạo với tâm ở lõi. Vì một điện tử có thể có những năng lượng khác nhau, nó có thể có những bán kính khác nhau đến lõi của nguyên tử. Tuy nhiên, mô hình có những vấn đề sau:



- Theo điện động học cổ điển, hạt có tích điện trên quỹ đạo dần dần tạo thành một lưỡng cực từ mà bức xạ năng lượng. Do mất mát năng lượng, hạt sẽ bị hút nhiều hơn vào lõi, mà dẫn đến đường đi như hình xoắn ốc. Cuối cùng hạt sẽ rơi vào lõi của nguyên tử.

37

cuu duong than cong . com

Nguyên tử Hydrogen (tt)

- Để giải quyết vấn đề này, ông Bohr đã đề nghị tiên đề sau: các mức năng lượng của nguyên tử và bán kính quỹ đạo được lượng tử hóa. Các mức năng lượng được cho phép của nguyên tử Hydrogen được cho bởi:

$$E_n = -\frac{E_B}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

với E_B là **năng lượng Bohr** và n là **số lượng tử nguyên tắc** (principle quantum number). Năng lượng Bohr được cho bởi:

$$E_B = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 a_B}$$

với a_B là bán kính Bohr, q là điện tích điện tử (là điện tích cơ bản) và ϵ_0 là hằng số điện môi chân không. Những năng lượng điện tử giữa những mức năng lượng E_n không được cho phép.

38

Nguyên tử Hydrogen (tt)

- ❑ Khi những năng lượng điện tử được lượng tử hóa và những bán kính của những mức năng lượng (energy levels) cũng được lượng tử hóa.
- ❑ Những mức năng lượng của một nguyên tử là duy nhất.
- ❑ Sự tạo thành hay tách ra của những mức năng lượng này cho phép tạo thành những **dải năng lượng** (energy bands).
- ❑ Những năng lượng, mà ở giữa những năng lượng đã được định nghĩa, được gọi là những dải năng lượng cấm (forbidden energy bands) hay những **dải cấm**.
- ❑ Người ta thường dùng đơn vị của năng lượng là eV (electronvolt). Đại lượng eV là đơn vị năng lượng tương ứng điện tử có được khi thế của nó tăng thêm 1V ($1\text{eV}=1.6 \times 10^{-19}\text{AVs}=1.6 \times 10^{-19}\text{J}$).
- ❑ Bán kính Bohr được cho bởi:

$$a_B = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi \cdot m_e q^2}$$

với h là hằng số Planck và m_e là khối lượng của điện tử.

39

cuu duong than cong . com

Nguyên tử Hydrogen (tt)

- ❑ Mô hình nguyên tử của Bohr có thể kết hợp với lý thuyết quang tử (photon) của Einstein. Hiệu số năng lượng giữa 2 mức năng lượng n và m (năng lượng photon) được cho bởi:

$$E_n - E_m = h \cdot f_{n,m} \quad n > m$$

E_n ứng với mức năng lượng cao hơn.

- ❑ Chuyển tiếp từ mức năng lượng cao hơn xuống thấp hơn dẫn đến mất năng lượng. Năng lượng được giải phóng dưới dạng photon, với f là tần số của ánh sáng được phát xạ. Tần số f và bước sóng λ tương ứng của ánh sáng được cho bởi:

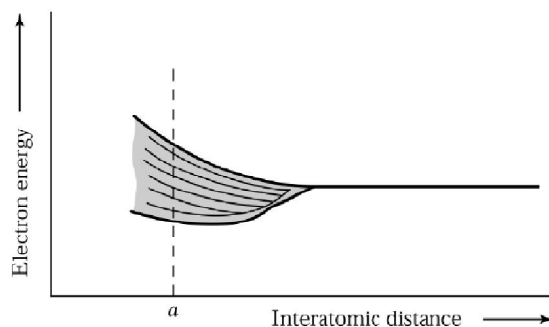
$$f_{n,m} = \frac{q^4 m_e}{8 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right|$$

$$\lambda_{n,m} = \frac{c}{f_{n,m}}$$

40

Những dải năng lượng

- Ta chuyển việc khảo sát từ nguyên tử đơn sang khảo sát chất rắn.
- Với một nguyên tử cách ly, các điện tử có các mức năng lượng rời rạc. Khi số p các nguyên tử cách ly được gom lại với nhau để tạo thành chất rắn, quỹ đạo của các điện tử ngoài cùng phủ lấp nhau và tương tác với nhau. Sự tương tác này bao gồm những lực hút và đẩy giữa các nguyên tử. Những lực hút giữa các nguyên tử gây ra sự dịch các mức năng lượng. Thay vì tạo thành những mức đơn, như trong trường hợp đơn nguyên tử, p mức năng lượng được tạo thành. Những mức năng lượng ở gần nhau. Khi p lớn, những mức năng lượng khác nhau tạo thành một dải liên tục. Những mức và do đó những dải có thể mở rộng lên nhiều eV tùy theo khoảng cách giữa các nguyên tử và phân tử.



Sơ đồ minh họa việc tách các trạng thái suy biến thành dải liên tục của các trạng thái [được] cho phép.

11

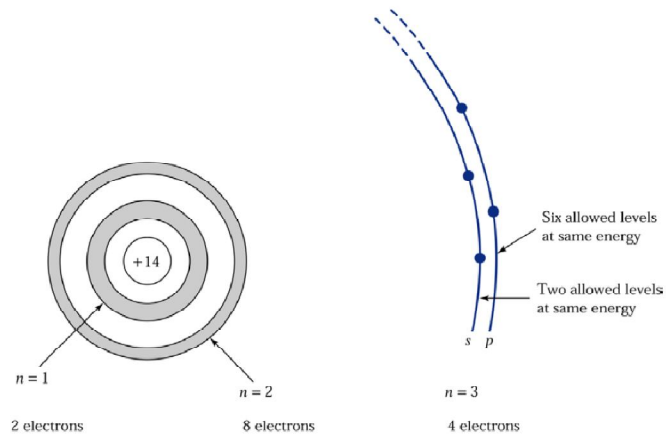
cuu duong than cong . com

Cấu trúc dải năng lượng của bán dẫn

- Bây giờ chúng ta chuyển từ mô tả tổng quát cấu trúc dải năng lượng trong chất rắn sang trường hợp cụ thể hơn của silicon. Một nguyên tử silicon cách ly có 14 điện tử. Trong 14 điện tử, có 10 điện tử chiếm những mức năng lượng sâu hơn. Do đó, bán kính quỹ đạo nhỏ hơn lực tách giữa những phân tử trong tinh thể. 10 điện tử bị liên kết chặt với các nguyên tử.
- Bốn điện tử dải hóa trị còn lại có liên kết yếu với lõi và có thể tham gia vào các phản ứng hóa học. Do đó, chúng ta có thể tập trung vào lớp vỏ ngoài cùng (mức $n=3$). Mức $n=3$ gồm các lớp vỏ con 3s ($n=3$ và $l=0$) và 3p ($n=3$ và $l=1$). Lớp vỏ con 3s có 2 mức trạng thái cho phép trên 1 nguyên tử và cả hai trạng thái được lấp bởi 1 điện tử (ở 00K). Lớp vỏ con 3p có 6 trạng thái cho phép và 2 trong các trạng thái này được lấp bởi những điện tử còn lại.

42

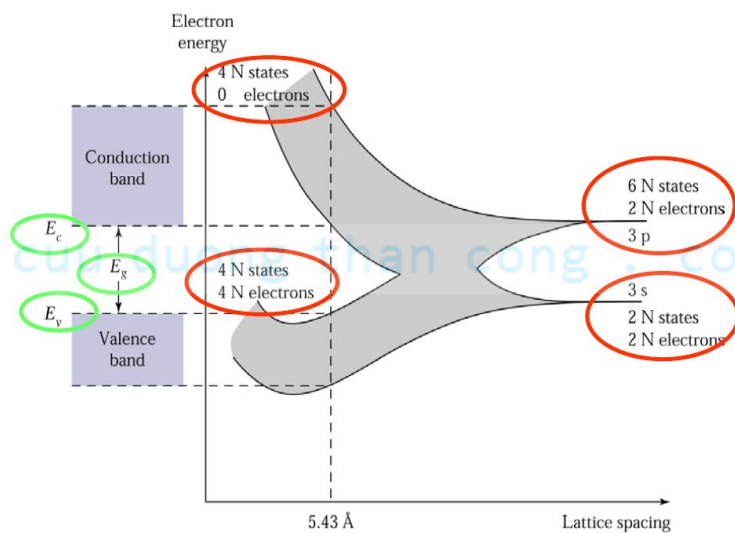
Biểu diễn sơ đồ của nguyên tử silicon cách ly



43

cuu duong than cong . com

Sự tạo thành những dải năng lượng trong silicon theo hàm khoảng cách giữa các nguyên tử trong mạng tinh thể.



44

Khe năng lượng (bandgap)

- Đáy của dải dẫn được gọi là E_C và đỉnh của dải hóa trị được gọi là E_V . Hiệu số năng lượng giữa đáy dải dẫn và đỉnh dải hóa trị được gọi là khe năng lượng E_G .
- Khe năng lượng $E_G = E_C - E_V$ ở giữa đáy dải dẫn và đỉnh dải hóa trị bằng bề rộng dải cấm. E_G là năng lượng cần để phá vỡ liên kết trong bán dẫn để cho một điện tử trong dải dẫn và để một lỗ trống trong dải hóa trị.
- Sự thiếu hụt một điện tử trong dải hóa trị được coi là một lỗ [trống tự do]. Sự thiếu hụt trong dải hóa trị có thể được lấp bằng điện tử lân cận, mà dẫn đến sự dịch chuyển vị trí thiếu hụt, xem như lỗ di chuyển. Lỗ có điện tích dương. Cả hai điện tử và lỗ góp phần vào tạo nên dòng điện.

45

cuu duong than cong . com

Giải đồ năng lượng-momentum

- Nếu 1 điện tử được kích thích vào dải dẫn, nó có thể di chuyển tự do trong tinh thể, từ đó điện tử có thể được xem như một hạt trong không gian tự do. Sự truyền lan của điện tử tự do có thể được mô tả bằng hàm sóng, là lời giải của phương trình Schrödinger. Hàm sóng cho điện tử tự do được cho bởi

$$\psi = A_1 \exp(ikx) + B_1 \exp(-ikx)$$

với k là vector sóng có phương trình sau:

$$k = \frac{p}{\hbar/2\pi}$$

p là momentum (mô-măn) của điện tử.

- Do biểu thức này, năng lượng điện tử có thể được cho trước theo hàm của vector sóng. Ta nói về biểu diễn không gian k . Các dải năng lượng lúc này có thể được xác định theo hàm của vector k .

46

Giải đồ năng lượng-momentum (tt)

Ta xét điện tử trong không gian tự do, khi đó điện tử có năng lượng E và momentum p như sau:

$$E_n = \frac{m_e v^2}{2}$$

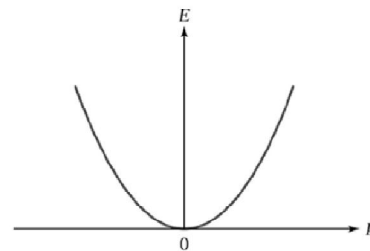
và

$$p = m_e v$$

Từ đó ta có thể biểu diễn E_n theo p như sau:

$$E_n = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{p^2}{2m_e}$$

với E_n : năng lượng của điện tử tự do
 m_e : khối lượng của điện tử
 v : vận tốc của điện tử



Energy momentum diagram for a free electron

47

cuu duong than cong . com

TD về giải đồ năng lượng - momentum

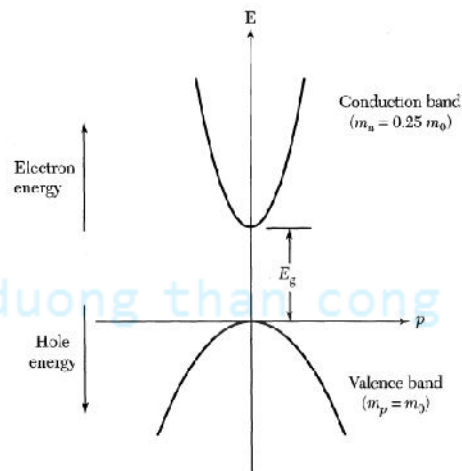
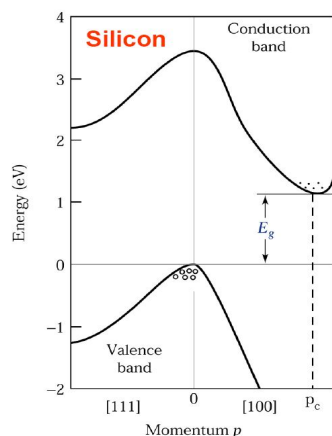


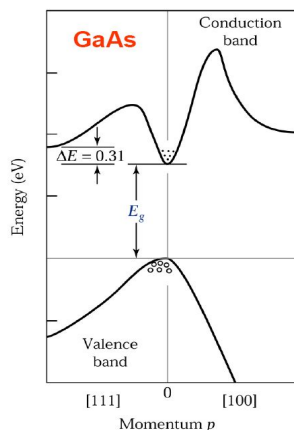
Fig. 17 A schematic energy-momentum diagram for a special semiconductor with $m_n = 0.25 m_0$ and $m_p = m_0$.

48

**Giản đồ năng lượng-momentum [cgl giản đồ dải năng lượng] của
(a) bán dẫn gián tiếp (Td: Si) và (b) bán dẫn trực tiếp (Td: GaAs)**



(a)



(b)

Indirect semiconductor

Direct semiconductor

- GaAs được gọi là *bán dẫn trực tiếp* vì nó không cần sự thay đổi momentum để chuyển điện tử từ dải hóa trị sang dải dẫn.
- Si được gọi là *bán dẫn gián tiếp* vì nó cần sự thay đổi momentum để chuyển điện tử từ dải hóa trị sang dải dẫn.

49

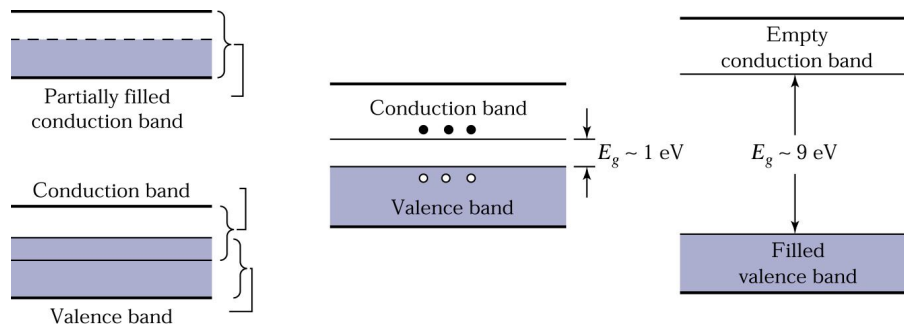
cuu duong than cong . com

**Sự dẫn điện trong kim loại, bán dẫn
và chất cách điện**

cuu duong than cong . com

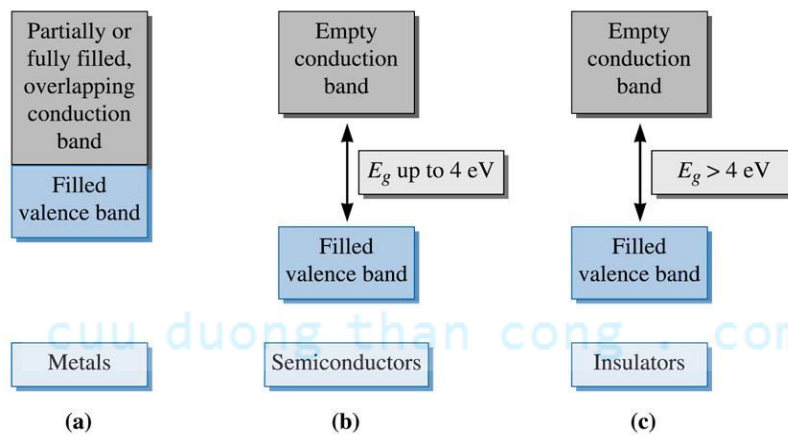
50

Schematic energy band representations of conductor, semiconductor, and insulator.



51

cuu duong than cong . com



Schematic of band structures for (a) metals, (b) semiconductors, and (c) dielectrics or insulators. (Temperature is 0 K.)

52

Người ta phân loại vật liệu theo:

- **Tính dẫn điện thông qua điện dẫn suất σ [S/m hay S/cm] của nó**
 - Chú ý:
 - Độ dẫn điện của bán dẫn ở giữa cách điện và dẫn điện.
 - Điện dẫn suất của bán dẫn có thể thay đổi do nó phụ thuộc vào: nhiệt độ, cấu trúc, độ thuần khiết, ánh sáng...
- **Miền (dải) năng lượng** thì phân chia vật liệu sẽ chính xác hơn cách trên.

TD:

 - Một số bán dẫn cơ bản: Si, Ge,... (thuộc nhóm IV) dùng để chế tạo diode, transistor và IC.
 - Một số bán dẫn phức hợp: GaAs, ZnS (thuộc nhóm III-V và II-VI tương ứng) dùng để chế tạo các dụng cụ tốc độ cao, cảm biến bức xạ,...

53

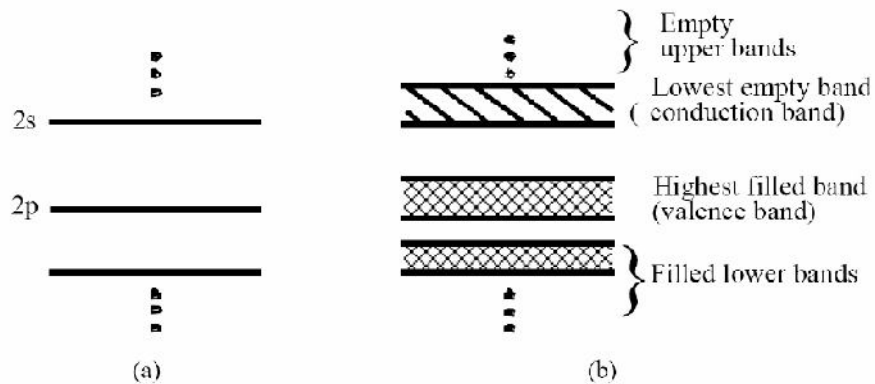
cuu duong than cong . com

Lý thuyết miền năng lượng (hay dải năng lượng) [Energy band theory]

- Mô hình nguyên tử Bohr.
- Các điện tử hóa trị là các điện tử ở lớp ngoài cùng của nguyên tử và nó tham gia liên kết hóa trị với các nguyên tử lân cận trong mạng tinh thể.
- Các điện tử trong một nguyên tử ở những mức năng lượng rời rạc.
- Trong mạng tinh thể các nguyên tử gần nhau tạo thành các dải năng lượng, ở giữa những dải năng lượng có điện tử (dải cho phép) là những dải năng lượng không có điện tử (dải cấm).

54

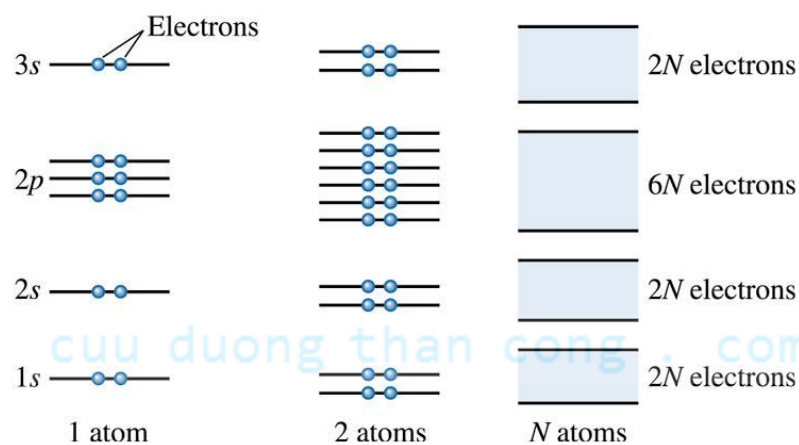
Thí dụ về mô hình dải năng lượng



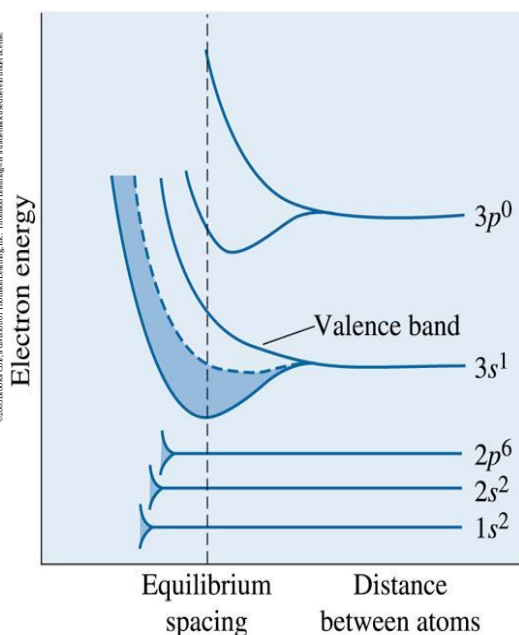
Hình 5.2 Thí dụ về mô hình dải năng lượng: (a) Các mức năng lượng của nguyên tử Si, (b) dải năng lượng của tinh thể Si.

Người ta chỉ quan tâm đến 2 dải năng lượng trên cùng là dải dẫn (conduction band) và dải hóa trị (valence band). Dải dẫn không có các điện tử và dải hóa trị có đầy các điện tử hóa trị với chất bán dẫn khi ở 0°K .

cuu duong than cong . com



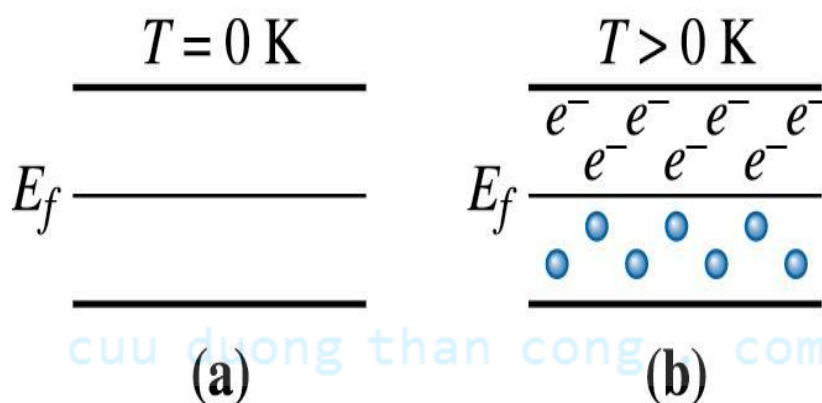
The energy levels broaden into bands as the number of electrons grouped together increases.



The simplified band structure for sodium. The energy levels broaden into bands. The 3s band, which is only half filled with electrons, is responsible for conduction in sodium.

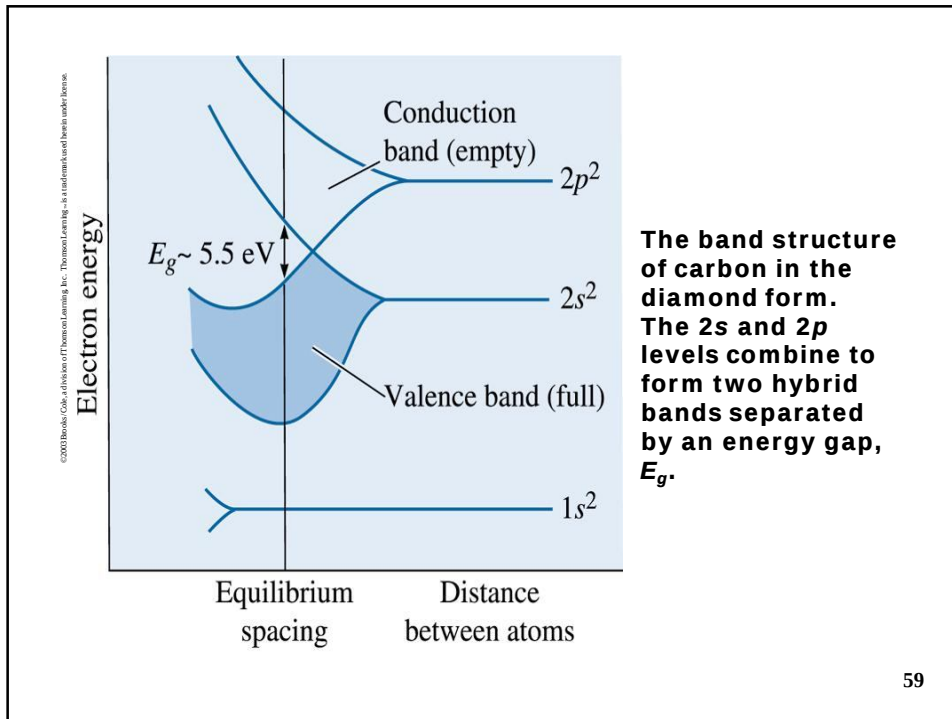
57

cuu duong than cong . com

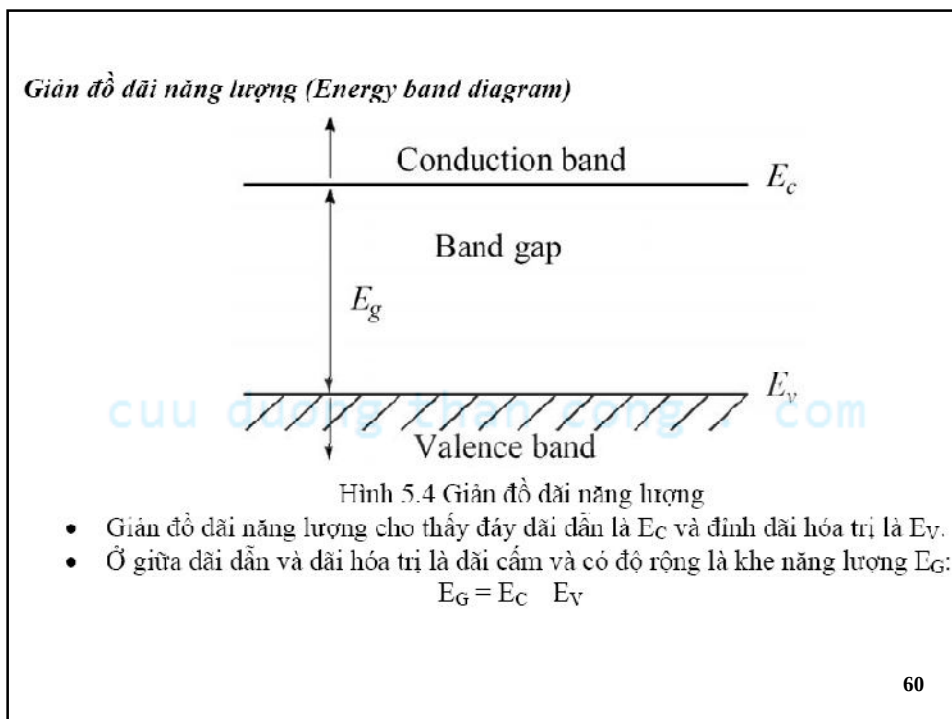


(a) At absolute zero, all of the electrons in the outer energy level have the lowest possible energy. (b) When the temperature is increased, some electrons are excited into unfilled levels. Note that the Fermi energy is unchanged.

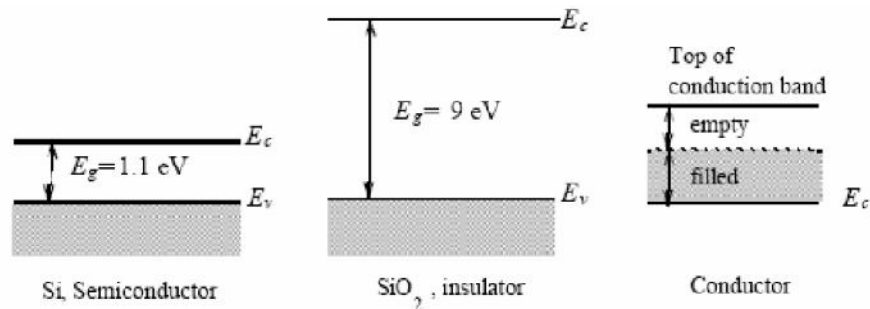
58



cuu duong than cong . com



Phân loại vật liệu theo khe năng lượng



Hình 5.5 Phân loại vật liệu theo khe năng lượng

Thí dụ E_g của một số vật liệu bán dẫn (ở $T=300^\circ\text{K}$):

Semiconductor	PbTe	Ge	Si	GaAs	GaP	Diamond
$E_g(\text{eV})$	0.31	0.67	1.12	1.42	2.25	6.0

61

cuu duong than cong . com

Một số thuật ngữ thường dùng trong lý thuyết dải năng lượng:

Một số thuật ngữ thường dùng trong lý thuyết dải năng lượng:

- **N_v :** mật độ trạng thái hiệu dụng của dải hóa trị, đây là số lỗ tối đa trên 1 đơn vị thể tích mà ta có thể tìm thấy trong toàn bộ vùng hóa trị.
- **N_c :** mật độ trạng thái hiệu dụng của dải dẫn, đây là số điện tử tối đa trên 1 đơn vị thể tích mà ta có thể tìm thấy trong toàn bộ dải dẫn.
- **n :** nồng độ điện tử (electron concentration) là số điện tử trên 1 đơn vị thể tích trong dải dẫn.
- **p :** nồng độ lỗ (hole concentration) là số lỗ trống trên 1 đơn vị thể tích trong dải hóa trị.

Chú ý: n và p còn được gọi là các nồng độ hạt tải (carrier concentration) vì chúng là những hạt mang điện tích tự do và chuyển động theo điện trường để tạo thành dòng điện.

62

2.5 Nồng độ hạt dẫn nội tại (Intrinsic concentrations)

63

cuu duong than cong . com

Các tính chất vật liệu và hạt dẫn

- **Bán dẫn thuần và bán dẫn có pha tạp chất (Intrinsic and extrinsic Semiconductors)**
 - Vật liệu được xem là **bán dẫn thuần** (còn gọi là bán dẫn nội tại hay tinh khiết) nếu vật liệu chứa một lượng tạp chất tương đối nhỏ.
 - Vật liệu được xem là **bán dẫn có pha tạp chất** (còn gọi là bán dẫn ngoại lai) nếu vật liệu chứa một lượng tạp chất tương đối lớn.
- **Bán dẫn ở cân bằng nhiệt**

Ta giả sử đang xét bán dẫn thuần và bỏ qua các ảnh hưởng của tạp chất với bán dẫn. Ngoài ra ta giả sử bán dẫn ở cân bằng nhiệt, nghĩa là bán dẫn không bị tác động bởi các kích thích bên ngoài như ánh sáng, áp suất hay điện trường. Bán dẫn được giữ ở nhiệt độ không đổi trên toàn bộ mẫu thử (nghĩa là không có gradient nhiệt độ trong chất bán dẫn).

64

Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn

Sau đây ta sẽ tính nồng độ hạt dẫn trong dải dẫn và dải hóa trị. Nồng độ hạt dẫn được cho bởi:

$$n = \int_{E_C^{bot}}^{E_C^{top}} N_e(E) \cdot F_e(E) dE$$

(nồng độ điện tử)

$$p = \int_{E_V^{top}}^{E_V^{bot}} N_h(E) \cdot F_h(E) dE$$

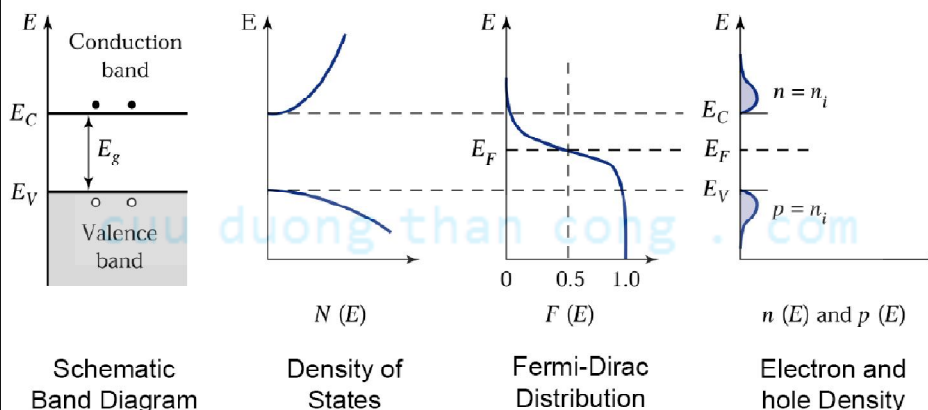
(nồng độ lỗ [trống])

với n và p là nồng độ điện tử và lỗ (số điện tử và lỗ trên 1 đvtt [$1/\text{cm}^3$]); $N_e(E)$ và $N_h(E)$ là mật độ trạng thái của điện tử và lỗ (những trạng thái năng lượng cho phép trên 1 dải năng lượng và trên 1 đvtt). $F_e(E)$ và $F_h(E)$ là những phân bố Fermi-Dirac cho điện tử và lỗ. Phân bố Fermi-Dirac là hàm xác suất mà cho biết 1 trạng thái được chiếm bởi 1 điện tử hay lỗ

65

cuu duong than cong . com

Bán dẫn thuần ở cân bằng nhiệt



66

Mật độ trạng thái

- Ta có thể tính các mật độ trạng thái bằng phương trình Schrödinger. Tuy nhiên ta sẽ không bàn về việc suy ra hàm mật độ trạng thái. SV có thể đọc thêm trong phụ lục H của sách “Semiconductor Devices”, tác giả M.S Sze.

$$N_c(E) = \frac{4\pi}{h^3} \sqrt{2m_e^3(E - E_c)}$$

$$N_v(E) = \frac{4\pi}{h^3} \sqrt{2m_h^3(E_v - E)}$$

với N_c là mật độ trạng thái điện tử và N_v là Mật độ trạng thái lỗ

- Mật độ trạng thái được xác định bởi một tham số vật liệu, đó là khối lượng hiệu dụng của điện tử (m_e) hay lỗ (m_h). Do đó, mật độ trạng thái của điện tử và lỗ thường khác nhau.

67

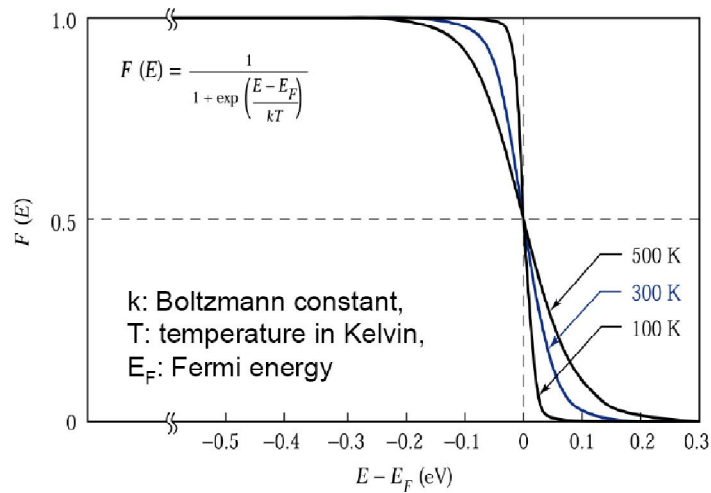
cuu duong than cong . com

Mức (hay năng lượng) Fermi E_F và nồng độ hạt dẫn cân bằng

cuu duong than cong . com

68

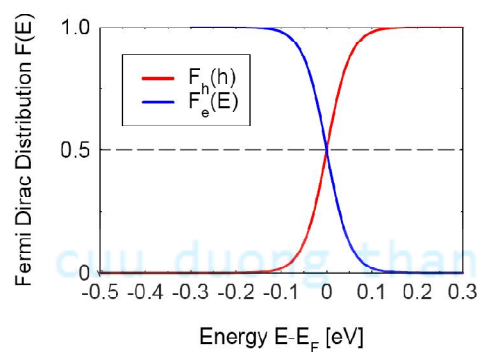
Thống kê Fermi-Dirac với ảnh hưởng của nhiệt độ



69

cuu duong than cong . com

Phân bố Fermi-Dirac của điện tử $F_e(E)$ và lỗ $F_h(E)$.



$$F_e(E) = \frac{1}{1 + \exp(E - E_F / kT)}$$

Fermi energy for electrons

$$F_h(E) = 1 - F_e(E) = \frac{1}{1 + \exp(E_F - E / kT)}$$

Fermi energy for holes

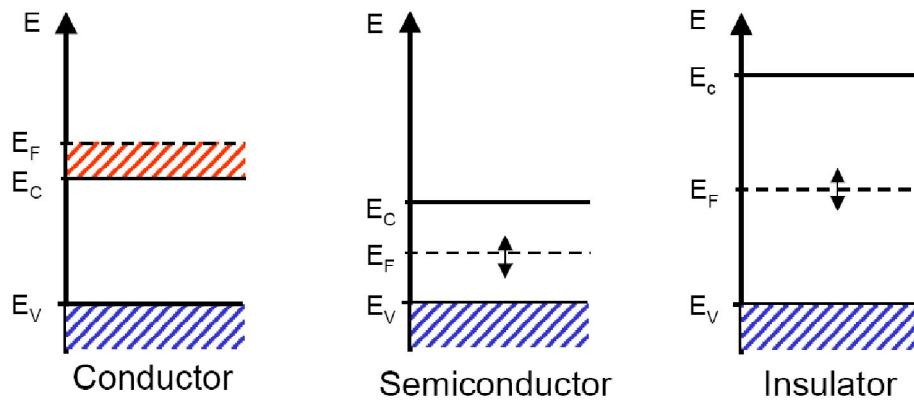
Cân bằng nhiệt

Chất bán dẫn ở cân bằng nhiệt, nếu nhiệt độ ở mỗi vị trí của tinh thể là như nhau, dòng điện tổng cộng qua vật liệu bằng 0, và chất rắn không bị chiếu sáng. Ngoài ra ta còn giả sử rằng không có phản ứng hóa học tham dự. Do đó năng lượng Fermi trên toàn vật liệu là như nhau:

$$E_F = E_F(x, y, z) = \text{const}$$

70

Năng lượng Fermi trong chất rắn



71

cuu duong than cong . com

Phân bố Boltzmann

Để tính nồng độ hạt dẫn cho điện tử và lỗ (n và p), ta cần giải tích phân Fermi.

$$n = N_C \cdot \mathfrak{I}_{1/2}(-(E_C - E_F)/kT)$$

$$p = N_V \cdot \mathfrak{I}_{1/2}(-(E_F - E_V)/kT)$$

Tuy nhiên ta không thể giải tích phân Fermi bằng giải tích. Do đó người ta dùng xấp xỉ để xác định mật độ hạt dẫn. Xấp xỉ này được gọi là phân bố Boltzmann.

$$n \approx N_C \cdot \exp(-(E_C - E_F)/kT) \quad \text{for } E_C - E_F \geq 2kT$$

Electron concentration, Boltzmann distribution

$$p \approx N_V \cdot \exp(-(E_F - E_V)/kT) \quad \text{for } E_F - E_V \geq 2kT$$

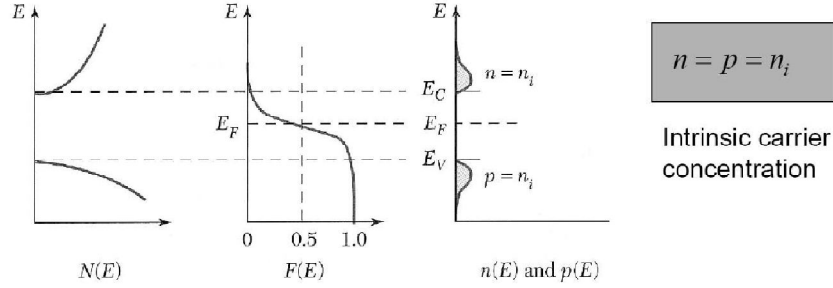
Hole concentration, Boltzmann distribution

Chú ý: Các phương trình trên chỉ áp dụng cho bán dẫn ở điều kiện cân bằng (đkc).

72

Nồng độ hạt dẫn nội tại

Trong bán dẫn thuần ta thấy nồng độ điện tử n và nồng độ lỗ p bằng nhau. Người ta gọi giá trị bằng nhau của n và p là **nồng độ hạt dẫn nội tại** n_i (intrinsic carrier concentration).



Hình 4.18 Nồng độ điện tử n , nồng độ lỗ p và nồng độ hạt dẫn nội tại n_i .

Dựa vào nồng độ hạt dẫn nội tại, ta có thể xác định năng lượng nội tại. Với bán dẫn thuần ở cân bằng nhiệt, năng lượng nội tại E_i bằng với năng lượng Fermi E_F .

$$E_F (n = p = n_i) = E_i$$

biểu thức của năng lượng nội tại tại E_i :

$$E_i = \frac{E_V + E_C}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right)$$

73

cuu duong than cong . com

Nồng độ hạt dẫn nội tại n_i

Ở nhiệt độ phòng, đại lượng thứ hai nhỏ hơn nhiều đại lượng thứ nhất. Do đó năng lượng nội tại rất gần với vị trí giữa khe năng lượng $(E_C - E_V)/2 = E_g/2$. Với Silicon, năng lượng nội tại lệch so với giữa khe năng lượng là $E_i - (E_C + E_V)/2 \approx -kT/2 = -13\text{meV}$. Năng lượng nội tại bị dịch về phía dải hóa trị. Với trường hợp GaAs thì ngược lại, năng lượng nội tại dịch về phía dải dẫn $E_i - (E_C + E_V)/2 \approx 3kT/2 = 39\text{meV}$.

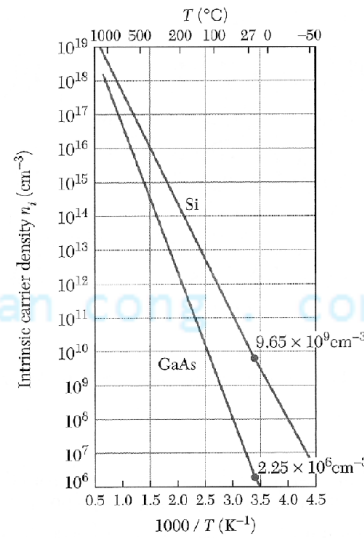
Dựa vào quan hệ $n = p = n_i$ ta có thể biểu diễn năng lượng nội tại theo mật độ trạng thái hạt dẫn của điện tử và lỗ. Từ 2 phương trình sau:

$$N_C = n_i \cdot \exp \left(\frac{E_C - E_i}{kT} \right)$$

$$N_V = n_i \cdot \exp \left(\frac{E_i - E_V}{kT} \right)$$

Ta tìm được năng lượng nội tại

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right)$$



Intrinsic carrier concentration for silicon and GaAs.

74

Biểu diễn n & p qua n_i

$$n \cong N_C \cdot \exp(-(E_C - E_F)/kT) \quad \text{for } E_C - E_F \geq 2kT$$

$$N_C = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_C - E_i}{kT}\right)$$

$$n = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

Electron concentration

$$p = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

Hole concentration

75

cuu duong than cong . com

TD các giá trị N_C , N_V và n_i của 1 số bán dẫn thông dụng (ở 300°K)

MATERIAL	CONDUCTION BAND EFFECTIVE DENSITY (N_C)	VALENCE BAND EFFECTIVE DENSITY (N_V)	INTRINSIC CARRIER CONCENTRATION ($n_i = p_i$)
Si (300 K)	$2.78 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$9.84 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Ge (300 K)	$1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$6.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$2.33 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
GaAs (300 K)	$4.45 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$7.72 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.84 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$

76

2.6 Chất Donor và chất Acceptor

Bán dẫn có pha tạp chất

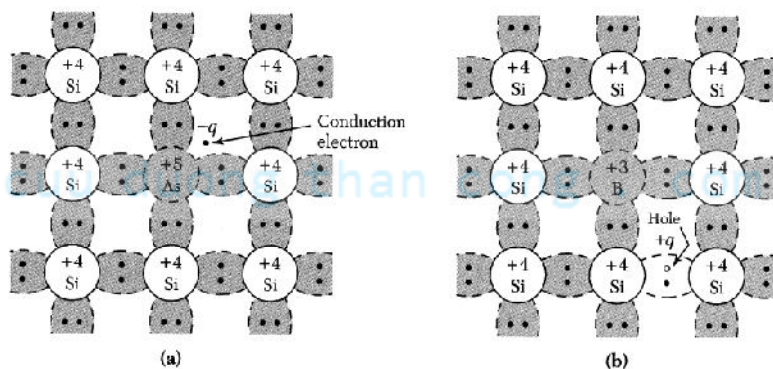
Bán dẫn loại P và bán dẫn loại N

77

cuu duong than cong . com

Chất cho điện tử (donor) và chất nhận điện tử (acceptor)

- Khi bán dẫn bị pha tạp chất (với 1 lượng lớn tạp chất) thì người ta gọi nó là bán dẫn ngoại lai hay bán dẫn có pha tạp chất. Trong phần này ta sẽ xét ảnh hưởng của các acceptor và donor lên các tính chất của vật liệu. Ta sẽ tập trung xét pha tạp chất cho silicon.



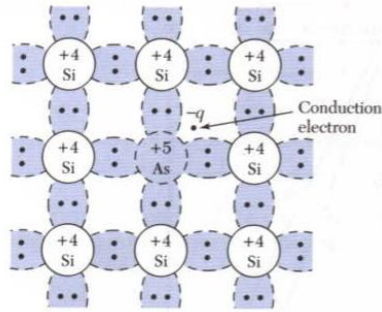
(a) Mạng tinh thể Si loại N với pha tạp chất bằng các nguyên tử donor As hay P (arsenic hay phosphorus).

(b) Mạng tinh thể Si loại P với pha tạp chất bằng các nguyên tử acceptor B (boron).

78

Donors

- When a semiconductor is doped with impurities
 - Extrinsic semiconductor
 - The impurity energy level are introduced
- N-type Si with donor
 - Arsenic atom with five valence electron
 - Covalent bonds with its four neighboring Si atoms
 - The fifth electron
 - Relatively small bonding energy to its host arsenic atom
 - Be “ionized” to become a conduction electron
 - The arsenic atom is called a **donor**
 - Silicon become n-type
 - Because the addition of the negative charge carrier

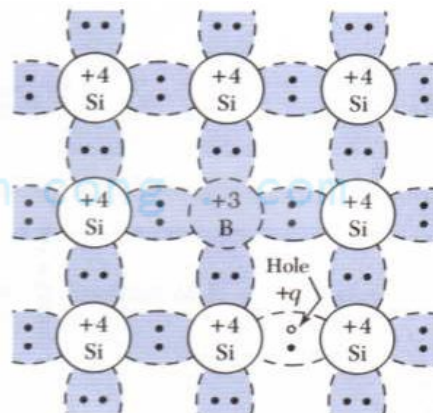


79

cuu duong than cong . com

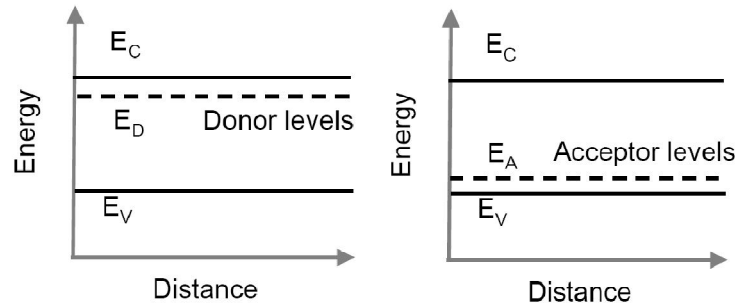
Acceptors

- P-type Si with acceptor
 - Boron atom with three valence electron
 - An additional electron is “accepted” to form four covalent bonds around the boron
 - A positive charged “hole” is created in the valence band
 - Boron is an **acceptor**



80

Giản đồ dải năng lượng của bán dẫn loại N và bán dẫn loại P



(a) Giản đồ dải năng lượng của bán dẫn loại N (b) Giản đồ dải năng lượng của bán dẫn loại P
Hình 4.20 Giản đồ dải năng lượng của bán dẫn loại N và bán dẫn loại P.

Khi ta tăng nồng độ donor thì mức Fermi sẽ dịch gần hơn tới đáy của dải dẫn. Do đó, hiệu số năng lượng giữa mức Fermi và dải dẫn ($E_C - E_F$) sẽ nhỏ hơn khi tăng nồng độ donor.

Tương tự như vậy với bán dẫn có pha acceptor: khi nồng độ acceptor càng cao thì mức Fermi sẽ chuyển đến càng gần dải hóa trị. Ở nhiệt độ phòng, kích thích nhiệt đủ cao để kích hoạt điện tử từ dải hóa trị sang dải dẫn. Kết quả là ta có được các ion chất nhận điện tử mang điện tích âm (do điện tử lấp vào) và hình thành các lỗ trong dải hóa trị. Mức năng lượng của acceptor (E_A) rất gần với dải hóa trị (hình 4.20b).

81

cuu duong than cong . com

Năng lượng ion hóa của các tạp chất trong Si và GaAs

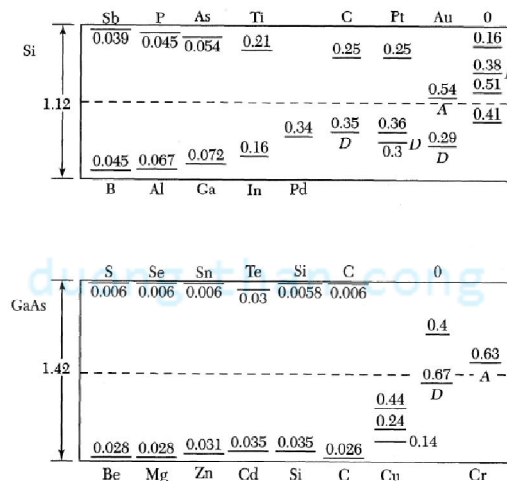


Fig. 24 Measured ionization energies (in eV) for various impurities in Si and GaAs. The levels below the gap center are measured from the top of the valence band and are acceptor levels unless indicated by D for donor level. The levels above the gap center are measured from the bottom of the conduction band and are donor levels unless indicated by A for acceptor level.⁸

82

2.7 Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn loại N và P

83

cuu duong than cong . com

Bán dẫn loại N

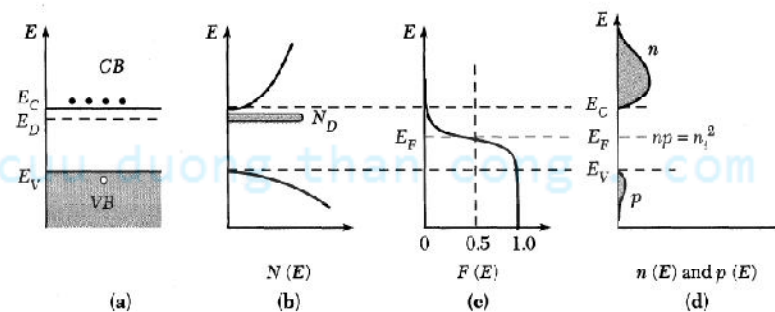


Fig. 26 *n*-Type semiconductor. (a) Schematic band diagram. (b) Density of states. (c) Fermi distribution function. (d) Carrier concentration. Note that $np = n_i^2$.

84

Quan hệ giữa nồng độ điện tử n và nồng độ lỗ trong bán dẫn

Với bán dẫn nội tại ở cân bằng nhiệt ta có các công thức sau:

$$p = n = n_i$$

và

$$p \cdot n = n_i^2$$

và với bán dẫn có pha tạp chất ở cân bằng nhiệt:

$$p \neq n, p \neq n_i, n \neq n_i$$

và

$$p \cdot n = n_i^2$$

$$n + N_A = p + N_D$$

Nếu ta giả sử rằng vật liệu chỉ được pha với donor, khi đó $N_A=0$ và ta còn phương trình: $n = p + N_D$. Do đó bán dẫn là bán dẫn loại N. Nồng độ lỗ bây giờ có thể được tính theo công thức sau (với chỉ số n để chỉ đang xét với bán dẫn loại N):

$$p_n = n_i^2 / n_n$$

Suy ra nồng độ điện tử của bán dẫn loại N:

$$n_n = \frac{1}{2} \left(N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} \right)$$

85

cuu duong than cong . com

Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn N

If both donor and acceptor impurities are present simultaneously, the impurity that is present in a greater concentration determines the type of conductivity in the semiconductor. The Fermi level must adjust itself to preserve charge neutrality, that is, the total negative charges (electrons and ionized acceptors) must equal the total positive charges (holes and ionized donors). Under complete ionization condition, we have

$$n + N_A = p + N_D \quad (30)$$

Solving Eqs. 20 and 30 yields the equilibrium electron and hole concentrations in an n-type semiconductor:

$$n = \frac{1}{2} \left[N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \right], \quad (31)$$

$$p_n = n_i^2 / n_n. \quad (32)$$

86

Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn P ($N_A > N_D$)

$$p_p = \frac{1}{2} \left[N_A - N_D + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \right], \quad (33)$$

$$n_p = n_i^2 / p_p \quad (34)$$

The subscript p refers to the p -type semiconductor.

87

cuu duong than cong . com

Bán dẫn có bổ chính (Compensated Semiconductor)

$N_D > N_A$
Assumption:
(n-type
semiconductor)

$$n_n = \frac{1}{2} \cdot \left[N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} \right]$$

$$N_D \gg n_i \Rightarrow n_n \approx N_D$$

Majority carriers
(n-type semiconductor)

$$p_n = \frac{n_i^2}{\frac{1}{2} \cdot \left[N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} \right]}$$

$$N_D \gg n_i \Rightarrow p_n \approx n_i^2 / N_D$$

Minority carriers
(n-type semiconductor)

$N_A > N_D$
Assumption:
(p-type
semiconductor)

$$p_p = \frac{1}{2} \cdot \left[N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2} \right]$$

$$N_A \gg n_i \Rightarrow p_p \approx N_A$$

Majority carriers
(p-type semiconductor)

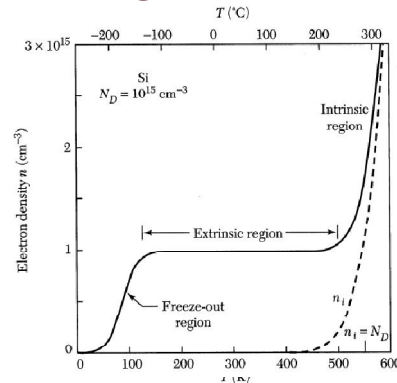
$$n_p = \frac{n_i^2}{\frac{1}{2} \cdot \left[N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2} \right]}$$

$$N_A \gg n_i \Rightarrow n_p \approx n_i^2 / N_A$$

Minority carriers
(p-type semiconductor)

Ảnh hưởng của nhiệt độ đến nồng độ hạt dẫn (Td: Si loại N, xét n_n)

- At low temperature
 - Thermal energy not sufficient to ionize all donor impurities
 - Some electron are “frozen” at the donor level
 - Electron density less than the donor concentration
- As the temperature increased
 - The condition of complete ionization is reached
 - $n_n = N_D$
- As the temperature is further increased
 - Electron concentration the same over a wide temperature range
 - Extrinsic region
- As the temperature is increased even further
 - The intrinsic carrier concentration becomes comparable to the donor concentration
 - The semiconductor become intrinsic
 - This temperature depend on N_D and E_g



89

cuu duong than cong . com

Bán dẫn suy biến và không suy biến

Phần lớn các dụng cụ điện tử, nồng độ điện tử và lỗ nhỏ hơn nhiều mật độ trạng thái hiệu dụng trong dải dẫn hay dải hóa trị. Mức Fermi tối thiểu cao hơn dải hóa trị $3kT$ hay thấp hơn dải dẫn $3kT$. Trong trường hợp này ta gọi **bán dẫn không suy biến** (non-degenerated semiconductor).

Khi pha rất nhiều tạp chất, các nồng độ tạp chất cao hơn các mật độ trạng thái hiệu dụng trong dải hóa trị và dải dẫn. Trong trường hợp như vậy ta có **bán dẫn suy biến** (degenerated semiconductor) và các mức Fermi dịch vào dải dẫn hay dải hóa trị. Dưới những điều kiện như vậy ta không thể áp dụng các phương trình đã được suy ở phần trước.

Tuy nhiên, việc chế tạo bán dẫn suy biến cũng cần thiết. Thí dụ chế tạo các diode LASER cần đảo ngược mật độ, mà có thể chỉ đạt được nếu bán dẫn là loại suy biến.

90